



REPUBLIK
ÖSTERREICH
Patentamt

(10) Nummer: **AT 408 812 B**

(12)

PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1467/99
(22) Anmeldetag: 26.08.1999
(42) Beginn der Patentdauer: 15.07.2001
(45) Ausgabetag: 25.03.2002

(51) Int. Cl.⁷: **G01M 1/00**

(73) Patentinhaber:
KRAL CHRISTIAN DIPL.ING. DR. TECHN.
A-1060 WIEN (AT).
(72) Erfinder:
KRAL CHRISTIAN DIPL.ING. DR. TECHN.
WIEN (AT).

(54) VERFAHREN ZUR ERKENNUNG VON EXZENTRIZITÄTEN DES LÄUFERS BEI
ASYNCHRONMASCHINEN DURCH MODELLRECHNUNGEN

AT 408 812 B

(57) Es wird aus dem über ein Maschinenmodell einer Asynchronmaschine berechneten Flußverkettenraumzeitgeber im statorfesten und rotorfesten Koordinatensystem ein Auswertewinkel bestimmt, der die Grundlage für die Detektion eines exzentrischen Rotors einer Asynchronmaschine bildet. Das Fehlererkennungsverfahren beruht auf der Untersuchung des mittleren Verlaufs einer aus dem Maschinenmodell berechneten Zustandsgröße in Abhängigkeit dieses Auswertewinkels. Als Indikator für einen exzentrischen Rotor dienen die aus dem mittleren Verlauf der Zustandsgröße ermittelten Fourierkoeffizienten, sowie gemäß Anspruch 2 auch die auf den Gleichanteil (= arithmetischen Mittelwert) des mittleren Verlaufs der Zustandsgrößen bezogen Fourierkoeffizienten.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erkennung eines exzentrisch gelagerten und/oder umlaufenden Rotors einer Asynchronmaschine mit Hilfe von Modellrechnungen einschließlich eines Auswerteverfahrens, wie es im Oberbegriff des Patentanspruchs 1 beschrieben ist.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik wird zur Erkennung von Rotorexzentritäten das Fourierspektrum eines Maschinenstroms herangezogen oder es wird die Ortskurve des aus den Zuleitungsströmen der Maschine gebildeten Raumzeigers auf Abweichungen vom symmetrischen Zustand hin untersucht. Die charakteristischen harmonischen Komponenten treten bei spannungsgespeisten Maschinen im Strom der Maschine und im Umrichterbetrieb, je nach Regelungsstrategie, sowohl in den Spannungen und in den Strömen auf, und bilden sich in jedem Fall auch im Drehmoment und anderen Zustandsgrößen der Maschine ab. Herkömmliche Verfahren sind für den Umrichterbetrieb daher nur bedingt tauglich. Da die Lage der auftretenden harmonischen Frequenzkomponenten in den Zustandsgrößen darüber hinaus auch vom Belastungszustand der Maschine abhängig ist, ist der wesentliche Vorteil der Erfindung gegenüber bislang eingesetzter Verfahren in der Vermeidung teurer Auswertegeräte für die Fourieranalyse, der universellen Tauglichkeit für den Netz- und Umrichterbetrieb, sowie der Unabhängigkeit vom Belastungszustand zu sehen.

Aufgabe der Erfindung ist es, mit Hilfe eines dem Stand der Technik entsprechenden Maschinenmodells einen Flußverkettungsraumzeiger zu berechnen und die charakteristischen harmonischen Komponenten der auftretende Pendelung einer aus der Modellrechnung bestimmten Zustandsgröße zu extrahieren. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die berechneten Pendelung der Zustandsgröße in Abhängigkeit eines fehlerspezifischen räumlichen Verdrehwinkels untersucht werden, wobei die Zustandsgröße einer laufenden Mittelwertbildung unterzogen wird. Für die erfindungsgemäße Umsetzung dieser Aufgabe ist ein dem Stand der Technik entsprechendes mathematisches Maschinenmodell erforderlich. Weiters ist gemäß einem der Stand der Technik entsprechende Information über die mechanische Winkelverdrehung des Rotors gegenüber dem Stator erforderlich, so daß der, der erfindungsgemäßen Auswertung zugrundeliegende Verdrehwinkel berechnet werden kann. Diese Winkelverdrehung kann beispielsweise über einen Drehgeber bestimmt werden.

Für die Berechnung des Flußverkettungsraumzeigers wird im folgenden am *Beispiel* des Spannungsmodell, das den Statorspannungsraumzeiger und den Statorstromraumzeiger als Eingangsgrößen sowie den ohmschen Widerstand der Statorwicklung als Modellparameter benötigt, herangezogen. Der Flußverkettungsraumzeiger wird dabei durch zeitliche Integration gewonnen:

$$\underline{u}_{s(s)} = r_s \underline{i}_{s(s)} + \frac{d\underline{\psi}_{s(s)}}{dt}$$

In obiger Formel bedeutet:

- $\underline{u}_{s(s)}$ Statorspannungsraumzeiger (statorfestes Koordinatensystem)
- $\underline{i}_{s(s)}$ Statorstromraumzeiger (statorfestes Koordinatensystem)
- $d\underline{\psi}_{s(s)}$ Änderung des Statorflußverkettungsraumzeigers (statorfestes Koordinatensystem)
- dt Änderung der Zeit
- r_s Statorwiderstand

Als *Beispiel* für eine Zustandsgröße, deren Pendelung untersucht werden soll, wird das aus dem Maschinenmodell berechnete Drehmoment der Maschine herangezogen. Über den Statorflußverkettungsraumzeiger und dem Statorstromraumzeiger kann das Drehmoment der Asynchronmaschine berechnet werden:

$$m = -\operatorname{Im}(\underline{i}_{s(s)}^* \underline{\psi}_{s(s)})$$

In dieser Formel bedeutet:

- $\underline{i}_{s(s)}^*$ konjugiert komplexer Statorstromraumzeiger (statorfestes Koordinatensystem)
- m Drehmoment der Maschine
- Im Imaginärteildarstellung

Aus dem mechanischen Winkelverdrehung des Rotors gegenüber des Stators und dem Statorflußverkettungsraumzeiger im statorfesten Koordinatensystem läßt sich der Flußverkettungsraum-

zeiger im rotorfesten Koordinatensystem berechnen:

$$\underline{\psi}_{st(r)} = \underline{\psi}_{s(s)} e^{-j\gamma_m}$$

5 In dieser Formel bedeutet:

- $\underline{\psi}_{st(r)}$ Statorflußverkettungsraumzeiger (rotorfestes Koordinatensystem)
- γ_m Winkelverdrehung zwischen Rotor und Stator
- e Eulersche Zahl (2,7183...)
- j imaginäre Einheit

10 Für die erfindungsgemäße Bestimmung des für die Auswertung relevanten Verdrehwinkels kann ein beliebiger Flußverkettungsraumzeiger (etwa der Statorflußverkettungsraumzeiger, wie am Beispiel des Spannungsmodells ausgeführt) herangezogen werden. Die eigentliche Bestimmungsvorschrift des erforderlichen Verdrehwinkels ist gemäß Fig. 1 gegeben. Als Eingangsgrößen dient ein Flußverkettungsraumzeiger im statorfesten Koordinatensystem (6) und der zugehörige Flußverkettungsraumzeiger im rotorfesten Koordinatensystem (7). Für die Berechnung des erfindungsgemäß benötigten Verdrehwinkels wird darüber hinaus der Parameter p (8) benötigt (Polpaarzahl der Maschine). Die beiden Raumzeiger (6) und (7) werden in (1) und (2) jeweils einer Argumentbildung unterzogen, das heißt, von diesen beiden komplexwertigen Zeigern werden jeweils die Winkel (9) und (10) bestimmt. Die Summe (3) der beiden Winkel (11) wird anschließend durch die Polpaarzahl p (8) der Maschine dividiert und vom Argument des statorfesten Statorflußverkettungsraumzeigers (9) in (5) subtrahiert, woraus sich der für die Auswertung relevante Winkel γ_e (13) ergibt.

25 Durch die Untersuchung einer aus dem Modell berechneten Zustandsgröße in Abhängigkeit dieses Verdrehwinkels erlaubt die Erfindung eine zeitinvariante, und damit eine von der Rotordrehzahl unabhängige Auswertung, die sowohl für den Netz- als auch den Umrichterbetrieb geeignet ist.

30 Durch Bestimmung des mittleren Verlaufs der untersuchten Zustandsgrößen in Abhängigkeit des berechneten Verdrehwinkels (13) werden ausschließlich fehlerspezifische Pendelungen der Zustandsgrößen erfaßt. Die erfindungsgemäße Fehlererkennung basiert daher auf einer räumlichen (entsprechend dem berechneten Verdrehwinkel) Untersuchung der betrachteten Zustandsgröße. Während der gesamten Meßzeit durchläuft der Auswertewinkel (13) mehrmals seinen gesamten Wertebereich. Alle harmonischen Pendelungen der Zustandsgröße, die zufolge einer Rotorexzentrizität auftreten, sind bezüglich des Auswertewinkels (13) als Fourierreihe darstellbar. Alle harmonische Pendelungen (fehlerfremde Frequenzen) die nicht zufolge eines exzentrischen Rotors auftreten werden daher durch die Mittelwertbildung eliminiert und treten im mittleren Verlauf der Zustandsgröße nicht in Erscheinung. Für die Bestimmung des benötigten Fehlerindikators ist daher auch eine ausreichend lange Meßdauer erforderlich. Die Berechnung des mittleren Verlaufs der Zustandsgröße in Abhängigkeit des Auswertewinkels (13) ist Gegenstand der Erfindung. Da nur die durch eine Exzentrizität verursachten harmonischen Komponenten eine Periodizität bezüglich des Auswertewinkels besitzen, läßt sich durch Bestimmung des mittleren Verlaufs der Zustandsgröße, also nach einer entsprechend langen Meßdauer, auf einen exzentrischen Rotor schließen. Darüber hinaus bewirkt die Bestimmung des mittleren Verlaufs der betrachteten Zustandsgröße, eine ausreichende Filterwirkung der berechneten Zustandsgröße, die im besonderen für den Betrieb der Maschine am Umrichter erforderlich ist.

45 Die Berechnung des mittleren Verlaufs wird im folgenden am Beispiel eines Segmentierungsverfahrens dargestellt. Als Beispiel für eine untersuchte Zustandsgröße wird das aus dem Maschinmodell berechnete Drehmoment verwendet. Für die Bestimmung des mittleren Verlaufs des Drehmoments wird der vollständige Wertebereich des Verdrehwinkel in eine feste Anzahl von äquidistanten Abschnitten (Auswertesegmenten) unterteilt (Fig. 2). Das aktuelle Auswertesegment wird über die Lage des berechneten Verdrehwinkel innerhalb seines gesamten Wertebereichs eindeutig festgelegt. Jedem betrachteten Auswertesegment ist ein Drehmomentmittelwert zugeordnet, der sich aus dem arithmetischen Mittelwert aller berechneten Drehmomente errechnet, für die der berechnete Verdrehwinkel innerhalb des betrachteten Segments liegt. Aufgabe der Segmentierung ist neben der Bestimmung des mittleren Verlaufs einerseits die Glättung und Filterung der berechneten Drehmomente, wie auch die Reduktion der anfallenden Datenmenge.

Entsprechend der gewählten Anzahl an Auswertesegmenten erhält man nach einer bestimmten Meßzeit für jedes Auswertesegment auch einen bestimmten Drehmomentwert, das heißt allgemein, daß nach einer bestimmten Meßdauer der mittlere Verlauf des Drehmoments in Abhängigkeit des Auswertewinkels vorliegt. Dieser mittlere Verlauf des Drehmoments kann nun einer einfachen Fourieranalyse unterzogen werden. Als erfindungsgemäßer Fehlerindikator für einen exzentrischen Rotor dienen die aus der Fourieranalyse des mittleren Verlaufs der Zustandsgröße berechneten harmonischen Komponenten (Fourierkoeffizienten). Überschreiten die Amplituden dieser Fourierkoeffizienten einen bestimmten Schwellwert, so liegt ein exzentrischer Rotor vor.

In Abwandlung zu den als Fehlerindikator dienenden Amplituden der Fourierkoeffizienten können gemäß Anspruch 2 der Erfindung auch die Amplituden der Fourierkoeffizienten bezogen auf den Gleichanteil (= arithmetischen Mittelwert) des mittleren Verlaufs verwendet werden. Im besonderen, wenn als Zustandsgröße das berechnete Drehmoment der Maschine herangezogen wird, ist dieses Verfahren vorteilhaft, da die daraus resultierenden Fehlerindikatoren unabhängig vom Belastungszustand der Maschine sind.

PATENTANSPRÜCHE:

1. Verfahren zur Erkennung von Exzentrizitäten des Läufers bei Asynchronmaschinen durch Modellrechnungen, dadurch gekennzeichnet, daß der aus einem mathematischen Maschinenmodell (z.B. Spannungsmodell) berechnete Flußverkettungsraumzeiger im statorfesten Koordinatensystem (6) einer Argumentbildung (1) unterzogen wird, also der Winkel (9) des komplexen Zeigers bestimmt wird, sowie der zugehörige rotorfeste Flußverkettungsraumzeiger (7) einer Argumentbildung (2) unterworfen wird, daß die Summe (3) dieser beiden Größen (11) durch die Polpaarzahl (8) dividiert wird (12), sowie das Divisionsergebnis vom vorher bestimmten Winkel (9) subtrahiert wird, woraus sich ein Auswertewinkel (13) ergibt, daß eine über das Maschinenmodell berechnete winkelabhängige Zustandsgröße (z.B. Drehmoment) in Abhängigkeit des Auswertewinkels (13) einer Mittelwertbildung unterzogen wird, daß von den nach einer bestimmten Meßdauer vorliegenden mittleren Verlauf der Zustandsgröße als Funktion des Auswertewinkels eine Fourieranalyse durchgeführt wird, daß die Amplituden der daraus bestimmten Fourierkoeffizienten als Fehlerindikator für einen exzentrischen Rotor dienen, sobald diese einen bestimmten Grenzwert überschreiten.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Fehlerindikator die Fourierkoeffizienten auf den Gleichanteil des mittleren Verlaufs der betrachteten Zustandsgröße bezogen werden.

HIEZU 1 BLATT ZEICHNUNGEN

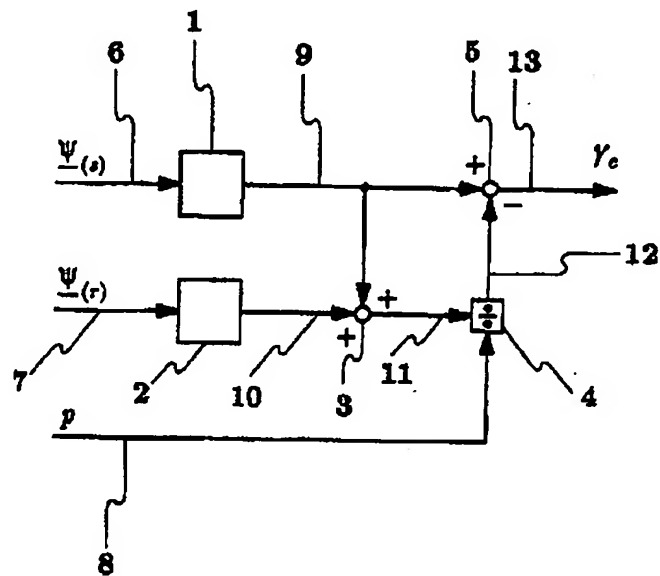


Fig. 1:

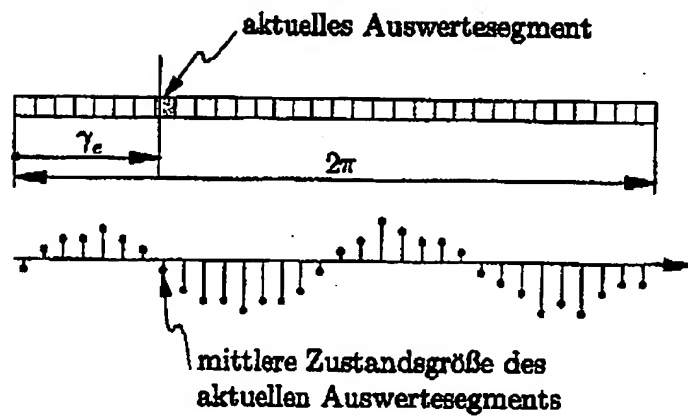


Fig. 2: